

Лабораторная работа №311

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

**Приборы и принадлежности:** исследуемый гальванический элемент, нормальный элемент, источник рабочего тока, реохорд, гальванометр, двухполюсный переключатель, магазин сопротивлений.

**Введение.** Компенсационный метод широко применяется для измерения различных электрических величин (электродвижущей силы, напряжения, силы тока, сопротивления). Этот способ измерения характеризуется самой высокой точностью среди прочих методов благодаря тому, что он основан на *сравнении* измеряемой величины с ее эталоном или образцовой мерой. Поэтому он применяется, в частности, для поверки и градуировки электроизмерительных приборов. На его основе действуют разнообразные самопишущие и показывающие потенциометры (в сочетании с термодарами) в химической, пищевой и др. отраслях промышленности, где измерение и регистрация температуры в ходе технологических процессов является необходимым условием. Ниже показано применение компенсационного метода к измерению двух электрических величин – ЭДС и внутреннего сопротивления источника.

**Электродвижущая сила источника тока и ее измерение.** Для поддержания в замкнутой цепи в течение длительного времени не изменяющегося по величине электрического тока необходимо обеспечить постоянство разности потенциалов на отдельных ее участках. Это становится возможным благодаря существованию так называемой сторонней силы (или сил), действующей либо на всем протяжении цепи, либо на некоторых участках ее. Сторонние силы обладают способностью разделять разноименные электрические заряды, поэтому они не могут иметь электрическую природу. Например, в химических источниках тока (гальванические элементы, аккумуляторы) сторонней силой является сила химической реакции.

Стороннюю силу можно охарактеризовать работой, которую совершает источник тока при перемещении электрических зарядов в цепи. Физическая величина, равная работе сторонней силы  $A$ , отнесенной к единице перемещенного положительного заряда  $q$ , называется электродвижущей силой (ЭДС)  $E$ , действующей в цепи или на участке,

$$E = \frac{A}{q}. \quad (1)$$

ЭДС гальванического элемента не зависит от размеров электродов и количества электролита, а определяется лишь их химическим составом и при изменении внешних условий изменяется незначительно [1—2].

При перемещении заряда от источника тока по замкнутой цепи и возвращении его в исходное положение система, состоящая из источника тока и внешней цепи, не меняет своего состояния. Пусть работа источника по перемещению электрического заряда идет только на выделение тепла, количество которого определяется *законом Джоуля-Ленца*

$$A = I^2 R t + I^2 r t, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока в цепи,  $R$  – сопротивление внешней части цепи,  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока,  $t$  – время.

Выражение (2) можно преобразовать следующим образом:

$$A = I t [I(R + r)] = q [I(R + r)], \text{ или}$$

$$\frac{A}{q} = I(R + r).$$

Учитывая, что  $A/q = E$ , получается выражение, называемое *законом Ома для полной цепи*,

$$E = I(R + r), \quad (3)$$

или

$$E = IR + Ir = U_{\text{внеш}} + U_{\text{внут}}. \quad (4)$$

Таким образом, ЭДС равна сумме напряжений на сопротивлениях внешнего  $U_{\text{внеш}}$  и внутреннего  $U_{\text{внут}}$  участков цепи.

Несмотря на то, что ЭДС измеряется в тех же единицах, что и напряжение – вольтах, ее нельзя *точно* измерить вольтметрами, действие которых основано на прохождении тока через их измерительный механизм. Любой такой вольтметр, подключенный к полюсам источника тока, показывает напряжение  $U_{\text{внеш}}$  меньшее, чем ЭДС источника  $E$  на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника

$$U_{\text{внеш}} = E - Ir. \quad (5)$$

В некоторых случаях слагаемым  $Ir$  можно пренебречь (если сопротивление вольтметра много больше внутреннего,  $R_V \gg r$ ), и тогда  $U_{\text{внеш}} \cong E$ , т.е. показания вольтметра *можно принять* за ЭДС источника тока.

Таким образом, можно сказать, что ЭДС источника – это разность потенциалов на его полюсах при разомкнутой внешней цепи  $U_{\text{внеш}} = E$  при  $I=0$ . В компенсационном методе измерения условие “разомкнутой” цепи создается особой схемой включения исследуемого источника и способом измерения – ток в цепи этого источника делают равным нулю.

Рассмотрим электрическую цепь, изображенную на рис.1. Здесь  $E_X$  – исследуемый источник тока,  $E_N$  – нормальный элемент,  $E$  – источник рабочего тока для питания реохорда, ЭДС которого существенно больше ЭДС и исследуемого источника, и нормального элемента,  $AB$  – *реохорд* (неизолированный высокоомный провод со скользящим контактными движком  $D$  и масштабной линейкой),  $R_{\text{рег}}$  – реостат регулировки рабочего тока,  $G$  – гальванометр.

Источники  $E_X$  и  $E$  присоединяются к точке  $A$  реохорда *одноименными* полюсами. Это – первое условие. Вторым необходимым условием для проведения компенсационных измерений является выполнение неравенств  $U_{AB} > E_X$  и  $U_{AB} > E_N$ , где  $U_{AB}$  – падение напряжения на реохорде за счет протекания по нему рабочего тока. В этом случае на реохорде можно найти такое положение движка  $D_1$ , что напряжение  $U_X$  на участке  $AD_1$   $U_X = E_X$ , тогда ток в цепи гальванометра будет равен нулю. В этом состоит эффект компенсации. При смещении движка  $D$  в ту или другую сторону в гальванометре появляется ток соответствующего направления.

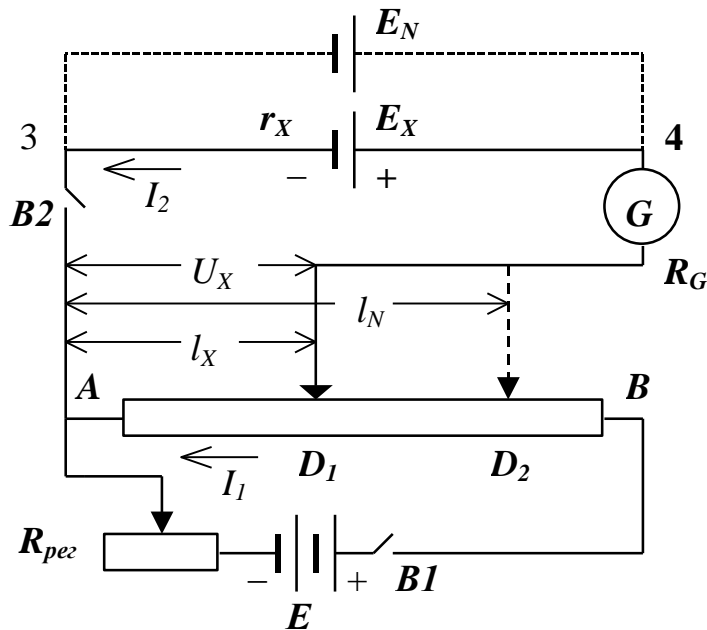
По *правилу Кирхгофа* для контура  $A-3-4-D_1-A$ , обходя его по часовой стрелке, можно написать следующее уравнение:

$$-I_2 r_X - I_2 R_G + I_1 R_{AD1} = E_X, \quad (6)$$

где  $r_X$  – внутреннее сопротивление источника  $E_X$ ,

$R_G$  – сопротивление гальванометра,

$R_{AD1}$  – сопротивление участка реохорда между точками  $A$  и  $D_1$ .



Когда ток через гальванометр  $I_2$  сведен к нулю, то уравнение (6) переходит в следующее:

$$I_1 R_{AD1} = E_X, \quad (7)$$

т.е. ЭДС исследуемого элемента компенсирована падением напряжения на участке  $AD_1$  реохорда при прохождении рабочего тока  $I_1$ .

Заменим исследуемый элемент так называемым *нормальным элементом*  $E_N$ . Передвигая движок по реохорду, можно также найти на нем некоторую точку,

Рис.1

обозначим ее  $D_2$ , что ток в цепи гальванометра также станет равным нулю. Тогда выражение (7) следует записать так:

$$I_1 R_{AD2} = E_N. \quad (8)$$

Ток в реохорде  $I_1$  при компенсации ЭДС того и другого источников остается одним и тем же, так как  $I_2 = 0$ . Разделив равенство (7) на (8), получим

$$E_X = E_N \frac{R_{AD1}}{R_{AD2}}. \quad (9)$$

Поскольку реохорд представляет собой однородную проволоку одинакового сечения, то отношение сопротивлений участков реохорда можно заменить отношением их длин. Формула (9) принимает следующий вид:

$$E_X = E_N \frac{l_X}{l_N}, \quad (10)$$

где  $l_X$  – длина участка реохорда  $AD_1$ ,  $l_N$  – длина участка  $AD_2$  [3].

Таким образом, неизвестная ЭДС может быть измерена *путем сравнения* ее с известной – ЭДС нормального элемента. Этот метод был предложен немецким физиком И.К.Поггендорфом (1796-1877). Роль измерительного прибора здесь сводится не к измерению величины тока, а к установлению его отсутствия. Для измерения ЭДС с большой точностью нужен очень чувствительный прибор – гальванометр.

Нормальный элемент является *образцовой мерой* электродвижущей силы в современной электроизмерительной технике благодаря тому, что 1)его ЭДС известна с высокой точностью, 2)она сохраняется в течение длительного времени (десятки лет). Значение ЭДС нормального элемента указывается в его паспорте. В наших условиях ЭДС при  $20^\circ\text{C}$   $E_{N 20} = 1,0186$  В. Если температура элемента  $t$  отличается от  $20^\circ$ , то ЭДС вычисляется по формуле

$$E_{Nt} = E_{N20} - 0,00004(t - 20) - 0,000001(t - 20)^2, \text{ вольт.} \quad (11)$$

В условиях *данной* работы температурная поправка лежит за пределами точности измерений, и вводить ее нет необходимости.

## Упражнение 1

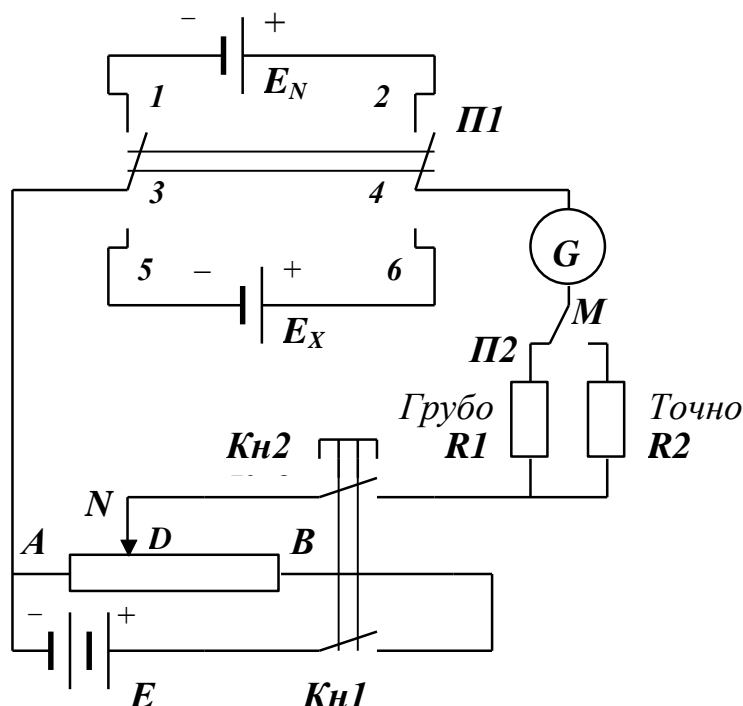
### Измерение электродвижущей силы гальванического элемента

**Описание установки.** Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рис.2. На лабораторной панели размещены следующие приборы и детали: нормальный элемент  $E_N$ , гальванометр  $G$ , реохорд  $AB$ , двухполюсный переключатель  $П1$ , переключатель чувствительности гальванометра  $П2$ , магазин сопротивлений (к упр.2), толкатель сдвоенных кнопок  $Кн1$  и  $Кн2$ . Исследуемый элемент  $E_X$  и источник рабочего тока  $E$  установлены под панелью. Провода от них подведены к клеммам  $E_X$  и  $E$  с указанием полярности (+ и –).

Кнопка включения гальванометра  $Кн2$  заблокирована с кнопкой включения рабочего тока  $Кн1$ . Блокировка выполнена так, что при нажатии на их общий толкатель кнопка  $Кн1$  замыкается раньше, чем кнопка  $Кн2$ , а размыкается позже. Такая последовательность замыкания и размыкания цепей предохраняет гальванометр от перегрузки экстратоками.

1. В компенсационных измерениях используется, как правило, гальванометр высокой чувствительности. Для защиты его от перегрузки значительными токами последовательно с ним включается через переключатель  $П2$  добавочный резистор  $R_1$  или  $R_2$ . В начале работы переключатель  $П2$  устанавливается в положение «*Грубо*», при этом в цепь гальванометра вводится большое сопротивление ( $R_1 = 1$  МОм). После того как достигнута компенсация (стрелка гальванометра приведена к нулю или отклоняется от него на 1-2 деления), переключатель  $П2$  переводится в положение «*Точно*». При этом в цепи гальванометра оказывается

меньшее сопротивление ( $R_2=200$  кОм) и процесс компенсации продолжается с большей точностью благодаря большей чувствительности гальванометра.



2. При всех измерениях кнопки  $Kn1$  и  $Kn2$  замыкаются на **короткое** время (**1-2 секунды**), так как продолжительное протекание тока по реохорду вызывает его нагревание и изменение сопротивления. Нарушение данного условия приводит к снижению точности измерений.

3. Так как номинальный разрядный ток нормального элемента составляет 1–10мкА, то его необходимо оберегать от

Рис.2

больших токов. Если

правильно пользоваться переключателем  $П2$ , ток нормального элемента не превышает указанного выше значения.

**Измерения.** 1. Двухполюсный переключатель  $П1$  поставьте в нейтральное положение, переключатель  $П2$  – в положение «Грубо».

2. Соберите электрическую цепь, схема которой приведена на рис.2.

При сборке цепи имейте в виду следующее:

- участок цепи от точки  $M$  до точки  $N$  уже собран (под панелью);
- концы высокоомного провода реохорда присоединены к клеммам  $A$  и  $B$ , а скользящий контакт реохорда – к клемме  $D$ .

3. Дайте возможность лаборанту (или преподавателю) проверить правильность сборки и, получив его разрешение, приступайте к измерениям.

4. Переключателем  $П1$  включите в цепь исследуемый элемент  $E_x$ . Замыкая на короткое время кнопки  $Kn1$  и  $Kn2$ , передвигайте движок реохорда до тех пор, пока ток в гальванометре не станет равным нулю (предварительная компенсация достигнута).

5. Переведите переключатель  $П2$  в положение «Точно» и тем же движком добейтесь наилучшей компенсации.

6. Запишите в подготовленную для этого таблицу 1 длину реохорда  $l_x$ , соответствующую полной компенсации.

7. Поставьте переключатель  $П2$  в положение «Грубо», а переключателем  $П1$  включите в цепь **нормальный элемент**  $E_N$ . Производя такие же действия как в п.4-5, добейтесь наилучшей компенсации ЭДС нормального элемента.

8. Запишите в таблицу значение  $l_N$ .

9. Повторите поочередно измерение  $l_x$  и  $l_N$  не менее пяти раз.

Таблица 1

$I_X$	$I_N$	$E_N$	$E_X$	$\bar{E}_X - E_{Xi}$	$(\bar{E}_X - E_{Xi})^2$

### Обработка результатов измерений.

1. Для каждого из пяти измерений вычислите по формуле (10) значение ЭДС исследуемого источника тока  $E_X$ .

2. Вычислите погрешность определения ЭДС по формуле Стьюдента как для прямых измерений и запишите окончательный результат в виде

$$E_X = \bar{E}_X \pm \Delta E_X$$

с указанием коэффициента надежности.

### Упражнение 2

#### Определение внутреннего сопротивления гальванического элемента

Внутреннее сопротивление  $r_x$  источника  $E_X$  может быть измерено с помощью электрической цепи, схема которой представлена на рис.3. Она отличается от предыдущей (см. рис.2) тем, что вместо нормального элемента включен магазин сопротивлений  $R$ . Теперь есть возможность измерить ЭДС  $E_X$  (так же как в упр.1) и напряжение  $U_{внеш}$  при наличии у источника тока внешней нагрузки в виде известного сопротивления  $R$ . Согласно формуле (5)

$$U_{внеш} = E_X - Ir.$$

С другой стороны,

$$U_{внеш} = IR.$$

Решение этих уравнений дает формулу для расчета внутреннего сопротивления источника тока:

$$r = R \left( \frac{E_X}{U_{внеш}} - 1 \right). \quad (12)$$

Проводить измерения рекомендуется в следующем порядке.

1. Скомпенсируйте ЭДС источника  $E_X$ . Для этого переведите переключатель  $\Pi 1$  на клеммы 5–6. Запишите в таблицу 2 длину компенсирующего участка реохорда  $l_X$ . Из формулы (7) получим

$$I_1 \rho \frac{l_X}{S} = E_X, \quad (13)$$

где  $I_1$  – ток в реохорде от источника рабочего тока  $E$ .

2. Замкните источник  $E_X$  на внешнее известное сопротивление  $R$  (магазин сопротивлений Р-32). Конкретное значение сопротивления  $R$  согласуйте с преподавателем. Скомпенсируйте напряжение на полюсах источника  $U_{внеш}$  и запишите соответствующую длину реохорда  $l_R$ .

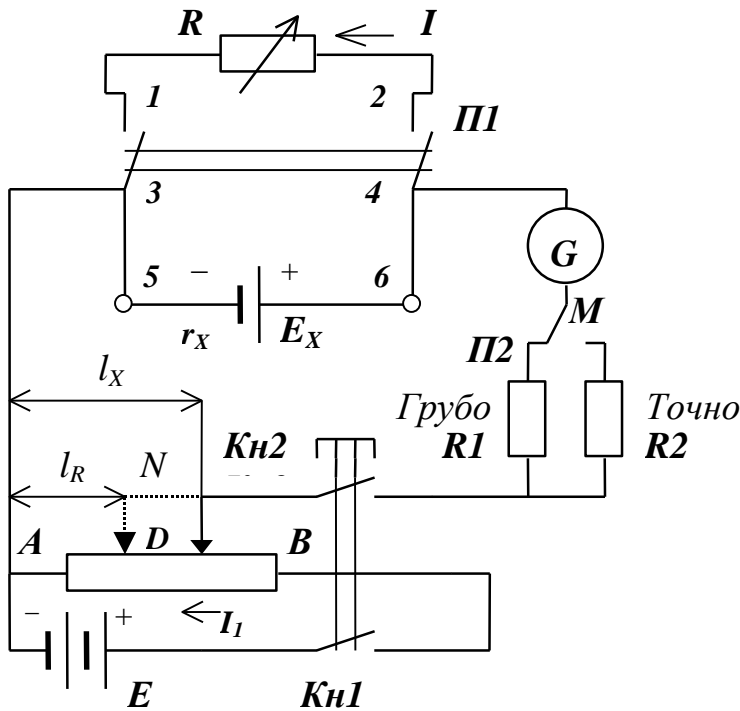


Рис.3

Вместо формулы (13) для данного случая можно записать, что

$$I_1 \rho \frac{l_R}{S} = U_{внеш}. \quad (14)$$

После подстановки уравнений (13,14) в формулу (12) получается следующее соотношение для расчета внутреннего сопротивления источника тока:

$$r_X = R \left( \frac{l_X}{l_R} - 1 \right). \quad (15)$$

Таблица 2

$R$	$l_X$	$l_R$	$r_X$	$\bar{r}_X - r_i$	$(\bar{r}_X - r_i)^2$

3. Сделайте не менее пяти измерений  $l_X$  и  $l_R$  при выбранном значении сопротивления  $R$ , записав результаты в таблицу 2.

4. Вычислите среднее значение внутреннего сопротивления источника тока по формуле (15). Определите погрешность измерений по Стьюденту и запишите результат в виде

$$r_X = \bar{r}_X \pm \Delta r_X,$$

указав коэффициент надежности.

Контрольные вопросы

1. Что такое химический источник тока? Что лежит в основе его работы? Изучите по учебнику какой-нибудь из них.
2. Что такое сторонние силы? Что собой представляют сторонние силы в химическом источнике тока и что в электрогенераторе электростанции?
3. От чего зависит ЭДС химического источника тока? Почему она не зависит от площади электродов? А что-то зависит от площади?
4. ЭДС измеряется в вольтах. Почему ее нельзя измерить вольтметром? Или все-таки можно? Что показывает при этом вольтметр?
5. В чем состоят преимущества компенсационного метода измерения ЭДС и как эти преимущества достигаются?
6. Какие требования к оборудованию и приборам нужно выполнить для успешного применения компенсационного измерения ЭДС?
7. Нарисуйте принципиальную схему электрической цепи для измерения ЭДС источника тока компенсационным методом.
8. Выведите рабочую формулу для расчета ЭДС по результатам измерений. Обоснуйте допущения, которые сделаны при ее выводе. Все ли они одинаково бесспорны?
9. Что влияет на точность измерения ЭДС компенсационным методом? Каковы средства достижения максимальной точности?
10. С какой целью в установке используются сдвоенные кнопки-выключатели? Какова последовательность их срабатывания?
11. Почему рекомендуется замыкать кнопки лишь на короткое время?
12. Расскажите подробно, как компенсационный метод используется для измерения внутреннего сопротивления источника тока. Почему нельзя измерить внутреннее сопротивление омметром, например?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс физики. М.: Наука, 1989. Т.2. §24–28.
2. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1977. §64–69.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Электричество. М.: Наука, 1983. §40–41.
4. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. §26.